

豪雨など極端気象の兆候を捉える フェーズドアレイ気象レーダ

Phased-Array Weather Radar to Sense Signs of Extreme Weather Events Including Torrential Rainfall

水谷 文彦

後藤 秀人

■ MIZUTANI Fumihiko

■ GOTOH Hideto

ゲリラ豪雨と呼ばれる局地的大雨などの主な原因は積乱雲であり、そのライフサイクルは10～30分程度と短く、また積乱雲内の活動により豪雨のほかにも雷や、突風、降ひょうなどの極端気象をもたらす。豪雨などの兆候を捉えるには、1分以内という高速での3次元(3D)観測や二重偏波技術を用いたマルチパラメータ(MP)観測が求められている。

今回東芝は、半径60 km、高度16 kmまでの気象現象を水平方向に1回転させるだけで隙間なく観測でき、観測に要する時間もわずか10～30秒に短縮したフェーズドアレイ気象レーダを開発した。また、フェーズドアレイ気象レーダのMP化を図るため、アンテナ技術や送受信モジュールなどの開発を進めている。

The major cause of extreme weather events, such as torrential rainfall, thunderstorms, sudden gusts of wind, hailstorms, and so on, is the rapid growth of cumulonimbus clouds within a short time span of about 10 to 30 minutes. To accurately grasp the growth of cumulonimbus clouds, a weather radar system must be able to perform both three-dimensional (3D) observations within a time frame of one minute and multiparameter (MP) observations using dual polarization.

Toshiba has already developed a phased-array weather radar for 3D weather observations, which can observe weather within a radius of 60 km and at altitudes up to 16 km with only one horizontal rotation of the antenna, while reducing the time required for observation to only 10 to 30 seconds. We are now developing technologies for key components to realize a dual-polarization phased-array weather radar, including a dual-polarized phased-array antenna as well as transmitter and receiver modules.

1 まえがき

近年、1時間の降水量が50 mm以上の非常に激しい雨の増加傾向が明瞭に現れている⁽¹⁾。ゲリラ豪雨と呼ばれる事前の予測が難しい局地的大雨が街を襲うと、中小河川の急激な増水に伴う被害や、雨水が集中しやすい低地やアンダーパスの冠水被害、土砂災害などをもたらすことがある。局地的大雨の主な原因は上空で急激に発達する積乱雲であり、積乱雲が発達すると豪雨のほか、雷や、突風、降ひょうなどの極端気象が発生し被害をもたらす。気象レーダには、積乱雲を観測することでその発達状況や内部構造を監視することが求められる。また、気象レーダの観測データは、近い将来の降水予測などに活用できる可能性もあり、気象レーダへの期待が更に高まっている。

一般に、一つの積乱雲が生じてから消滅するまでの時間(ライフサイクル)は、30分程度とかなり短いことが知られている。これに対して、パラボラアンテナを用いる従来型気象レーダでは、MP化されたことで積乱雲内部の雨や雪などの降水粒子を判別できるまでになったが⁽²⁾、積乱雲の3D構造を捉えるには5～10分程度の時間が必要である。この時間で観測できる方向は、方位角方向については360°と全方向であるものの、仰角方向については合計で10～20°程度と観測したい全角度(理想的には0～90°)の数分の1程度に限られている。

このように、観測時間間隔や空間的な観測間隔が粗いため、積乱雲の内部状況やその発達傾向を早期に知ることが難しいという課題があった。

そこで東芝は、観測時間間隔の短縮と観測仰角数の増加を同時に実現するため、複数のビーム形成を一つのアンテナで実現できるデジタルビームフォーミング(DBF)技術を用いたフェーズドアレイ気象レーダを開発した。ここでは、開発したレーダの概要と特長、局地的大雨に対する高速・高密度観測の評価結果とともに、フェーズドアレイ気象レーダのMP化に向けた取組みについて述べる。

2 フェーズドアレイ気象レーダ

2.1 概要

フェーズドアレイ気象レーダの運用イメージを図1に示す。X帯(9 GHz帯)の周波数を用いた約2×2 mサイズのアンテナで、都市域で発生する局地的大雨や、突風、竜巻、降ひょうなどの極端気象を下層から上層までリアルタイムに捉えるために、通常は都市域のビルや鉄塔の上に設置される。今回開発したフェーズドアレイ気象レーダは国立大学法人 大阪大学、及び独立行政法人 情報通信研究機構(NICT)の未来ICT研究所(神戸市)と沖縄電磁波技術センター(図2)の3か所に設置され、降水観測を試験的に実施している。図1ではアンテナ

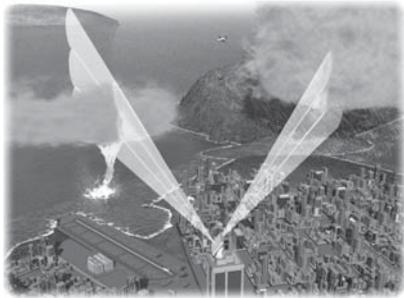


図1. フェーズドアレイ気象レーダの運用イメージー都市域で発生するゲリラ豪雨などの3D観測を行う。
Observation of cumulonimbus clouds using phased-array weather radar



図2. フェーズドアレイ気象レーダー NICT 沖縄電磁波技術センター内の鉄塔上にレドームで覆われたアンテナを設置している。
Phased-array weather radar

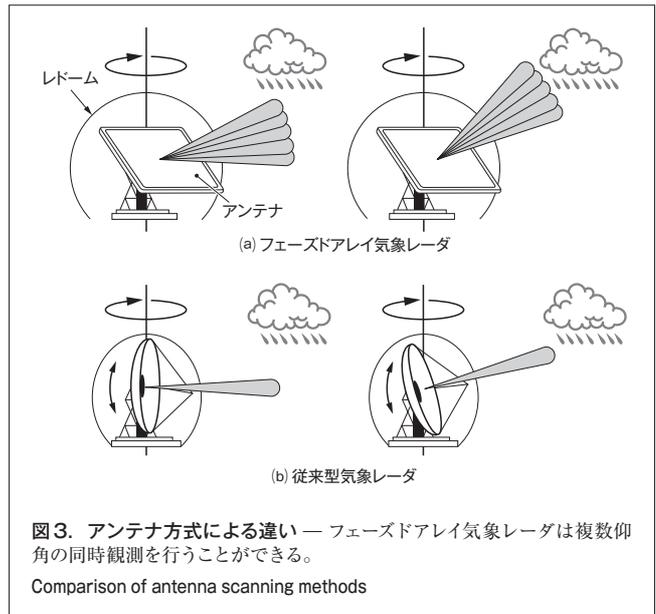
が露出した形で描かれているが、実際はアンテナを保護するためのレドームで覆われている。

2.2 観測の高速・高密度化

フェーズドアレイ気象レーダと従来型気象レーダとの違いを模式的に図3に示す。

従来型気象レーダは、パラボラアンテナを用いてペンシルビームと呼ぶビーム幅1°程度の電波を送受信している(図3(b))。1回転当たり1仰角だけの観測であるため、ある仰角で方位角方向に1回転させ、次に仰角を変更してまた1回転させるということを繰り返して観測を行う。このため、5分程度の観測時間では仰角数が10程度の観測しかできず、3D空間全てをカバーするために必要な仰角数である100程度(仰角0°～90°に相当)の観測は困難であった。

これに対して、今回開発したフェーズドアレイ気象レーダでは、1次元フェーズドアレイアンテナを採用した。全方向を全て電子的に走査するのではなく、方位角方向を機械駆動で行い、仰角方向だけを電子走査で行うものである。アレイ数を抑えることで、従来型気象レーダのコストと同程度にすることを目指している。



電子走査は、図3(a)に示すように、仰角ビーム幅の広いファンビームを送信し、DBF技術によって送信ファンビームが照射する仰角範囲に複数ビームを同時形成し、降水粒子などからの反射電波を一度に受信して複数仰角を同時観測する。方位角方向に1回転させることで、10～30秒で3D空間全てを観測できる。すなわち、仰角方向にファンビームを用いて、下層から上層まで複数仰角分の電波を一度に放射し、受信時はDBF技術を用いて受信したい仰角だけに複数のペンシルビームから成るマルチビームを形成する。こうしてアンテナを1回転するだけで、3D空間を隙間なく観測できるのがこの方式の特長である⁽³⁾。

2.3 仕様

フェーズドアレイ気象レーダの主な仕様を表1に示す。観測レンジ約20 km、高度16 kmの円筒形をした空間を10秒周期で観測する“高速モード”と、観測レンジ約60 km、高度16 kmの円筒形をした空間を30秒で観測する“広域モード”を備えている。

表1. フェーズドアレイ気象レーダの主な仕様

Main specifications of newly developed phased-array weather radar

項目	仕様		
送信出力	430 W以上		
送信周波数	9,320～9,445 MHz (5 MHz間隔)		
ビーム幅	約1°		
運用モード	観測レンジ	高速モード 約20 km	広域モード 約60 km
	高度	16 km	16 km
	観測時間	10秒	30秒
	ヒット数	約10	約20
	観測仰角数	約100	約100

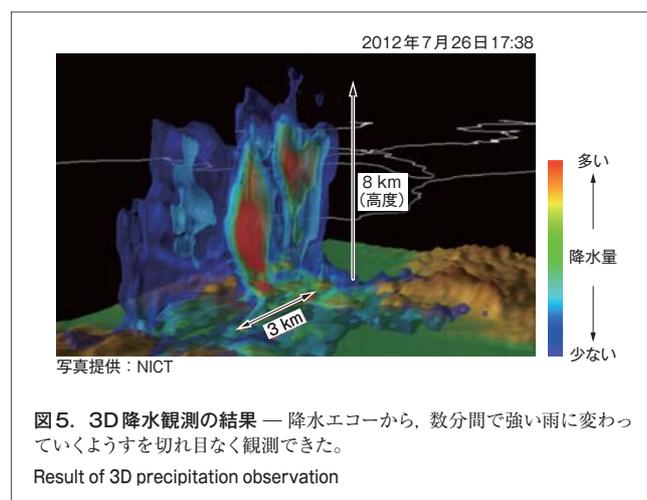
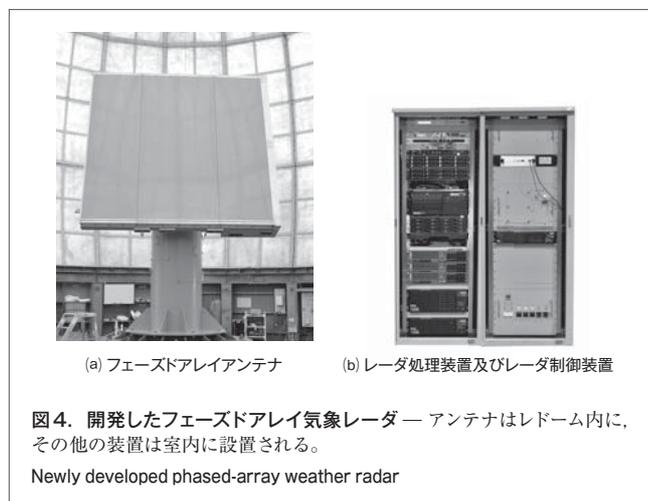
全国的に展開されているC帯(5 GHz帯)気象レーダは、極端気象よりも空間スケールの大きな気象現象を観測対象としており、300 km程度の遠方観測が求められるものの、大気下層の観測や空間分解能の低化については問題とならない。それに対して開発したフェーズドアレイ気象レーダは、比較的空間スケールの小さい極端気象をその下層から上層までリアルタイムに捉えることが目的であり、観測レンジが大きくなると地球が球体である影響から大気下層の観測が難しくなることと、空間分解能が低下することから、観測レンジを最大60 kmとしている。

60 km程度を観測する従来型のX帯気象レーダと表1に示した広域モードとを、観測仰角数と観測時間間隔と比べると、フェーズドアレイ気象レーダの観測仰角数は100と従来型の10に対して10倍多く、かつ観測時間間隔は30秒と従来型の5分に対して1/10に短縮されており、結果として100倍の性能向上を達成していると言える。

フェーズドアレイ気象レーダは、図4に示すように、フェーズドアレイアンテナと、レーダ処理装置及びレーダ制御装置から成る。アンテナ部は128本のスロット導波管を用いている。アンテナ面のチルト角を仰角30°に固定し、仰角方向-30°~+60°の範囲を電子走査により電波を送受信することで、仰角方向を0°~90°まで隙間なく観測できる。このシステムによって、空間分解能は20 km先で約500 m、60 km先で約1.3 kmと、これまでのパラボラアンテナを用いた従来型気象レーダの空間分解能を維持したまま、積乱雲の3D構造を把握するうえで重要なレーダ反射因子などのデータは高速モードで最短10秒で取得することが可能になった。

2.4 試験観測結果

開発したフェーズドアレイ気象レーダを、前述の3地点のビル屋上や鉄塔上に設置して、試験観測を実施している。図5に示す2012年7月26日の事例では、一つの積乱雲エコーの大きさは水平方向3 km、鉛直方向8 km程度であるが、高度



4~6 kmにゲリラ豪雨の卵とも呼ばれる降水エコーが現れた後、急激に成長しながら数分間で強い雨として地上に落下するようすを30秒ごとに切れ目なく観測できた。

このように局地的な気象現象の変化を連続的に捉えることが可能になったことで、局地的大雨や、突風、竜巻などの極端気象による災害防止に役だつと期待される。

3 MP化への取組み

2章で述べたフェーズドアレイ気象レーダは、降水量の観測のほか、ドップラー効果を応用したドップラー観測機能により風の観測が可能である。しかし、近年パラボラアンテナを用いた従来型気象レーダで普及している水平、垂直の二つの偏波を利用した二重偏波観測機能は備えておらず、水平偏波だけを用いる単一偏波のレーダである。二重偏波観測機能を持つことで、降水粒子の粒径を考慮した降水量の推定も可能になる。

MPレーダは、ドップラー観測機能と二重偏波観測機能を統合し、降水から反射される電波の情報(強度や、位相、偏波など)を多くのパラメータで読み取り、より高度な降水の性質を推定できる気象レーダである。偏波間位相差や、偏波間相互相関、差分レーダ反射因子などの偏波パラメータとともに、通常のドップラー気象レーダと同様にレーダ反射因子やドップラー速度などのパラメータも同時に測定できる。これらのパラメータを解析することで、図6に示すような積乱雲内の降水粒子を判別することが可能になる。今後、フェーズドアレイ気象レーダがMP化され、粒子判別ができるようになることで、雷や、突風、降ひょうなどの極端気象の兆候を捉えることが期待されている。

MPフェーズドアレイ気象レーダを実現するには、交差偏波特性に優れた二重偏波アレイアンテナ及びレーダアンテナの小型・低コスト化の二つの課題を解決する必要がある、現在次に述べる要素技術の開発を進めている。

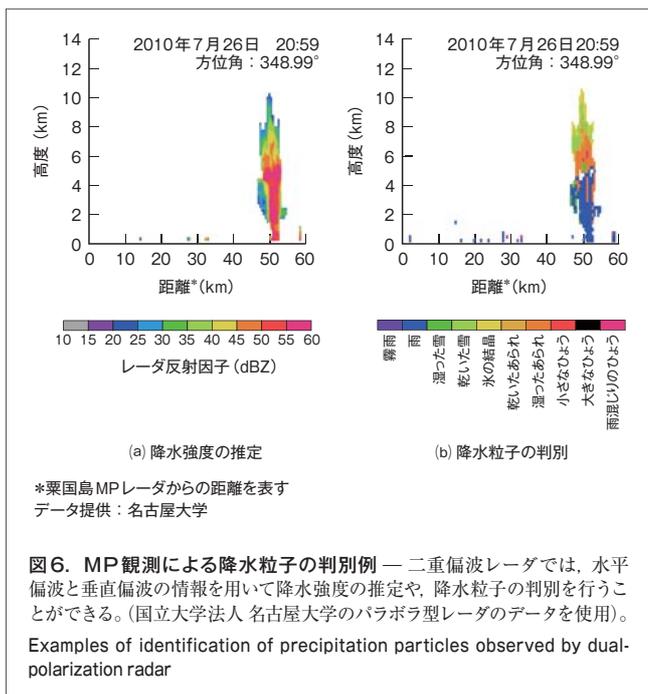


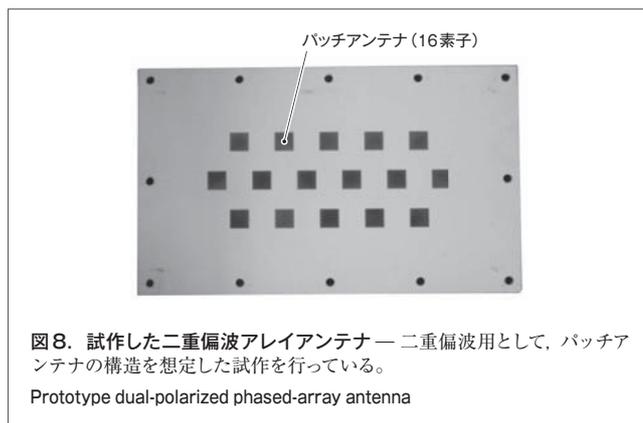
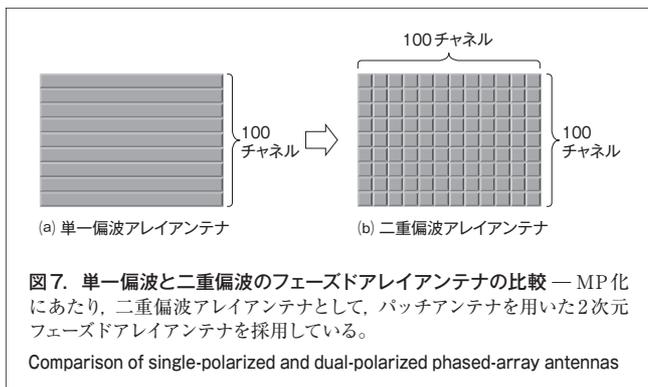
図6. MP観測による降水粒子の判別例 — 二重偏波レーダでは、水平偏波と垂直偏波の情報を用いて降水強度の推定や、降水粒子の判別を行うことができる。(国立大学法人名古屋大学のパラボラ型レーダのデータを使用)。
Examples of identification of precipitation particles observed by dual-polarization radar

3.1 二重偏波アレイアンテナの開発

単一偏波のフェーズドアレイ気象レーダでは、約100本の導波管スロットアンテナを採用して1次元フェーズドアレイアンテナの形状とした。しかし、導波管スロットアンテナを二重偏波化することは難しいことから、素子としてパッチアンテナを採用した。パッチアンテナにより1次元フェーズドアレイアンテナと同程度のアンテナ開口を実現するには、図7に示すように10,000素子程度のパッチアンテナが必要になる。この規模のアンテナとなることを見据えて、交差偏波特性の要求値の達成を目指した試作(図8)及び性能評価を進めている。

3.2 レーダアンテナの小型・低コスト化

レーダアンテナのサイズ及びコストへのインパクトがもっとも大きいRF(Radio Frequency)フロントエンド部の小型・低コスト化に絞った開発を進めている。これまでに、RFフロントエンド部の主要機能について半導体技術を用いて高集積化することで、小型・低コスト化を実現するめどが立った。



4 あとがき

フェーズドアレイ技術を活用した気象レーダを開発し、局地的大雨の観測に成功した。更に、雷や、突風、降ひょうなど、積乱雲の発達に伴う極端気象の兆候を捉えるため、フェーズドアレイ気象レーダのMP化の開発を進めており、当社は、今後も気象防災に資するレーダシステムの提供を目指して開発を進めていく。

この成果の一部は、NICTの委託研究「次世代ドップラーレーダー技術の研究開発」及び総務省の委託研究「周波数の有効利用を可能とする協調制御型レーダーシステムの研究開発」により得られた。

文献

- 気象庁. “アメダスで見た短時間強雨発生回数の長期変化について”. 気象庁ホームページ. <<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/info/heavyraintrend.html>>. (参照2014-09-05).
- 柏木俊治 他. 局地的集中豪雨を監視するX帯固体化気象レーダ. 東芝レビュー. 66, 4, 2011, p.36-39.
- 水谷文彦 他. 局地的豪雨の盛衰を立体的に捉えるフェーズドアレイ気象レーダ. 東芝レビュー. 68, 7, 2013, p.43-46.



水谷 文彦 MIZUTANI Fumihiko

社会インフラシステム社 小向事業所 電波応用技術部主務。
気象・防災システムの開発設計に従事。
Komukai Complex



後藤 秀人 GOTOH Hideto

社会インフラシステム社 小向事業所 電波応用技術部主務。
フェーズドアレイレーダの開発設計に従事。
Komukai Complex